

沈石妍, 王智能, 杨柳, 等. 膜法红糖加工中纳滤甘蔗植物水品质的分析 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(4): 41-49. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022040139

SHEN Shiyan, WANG Zhineng, YANG Liu, et al. Quality Analysis of Sugarcane Plant Water by Nanofiltration During the Processing of Membrane-Process Brown Sugar[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(4): 41-49. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022040139

· 研究与探讨 ·

膜法红糖加工中纳滤甘蔗植物水品质的分析

沈石妍, 王智能, 杨柳, 杨婷, 尚试雄, 崔杰, 应雄美*

(云南省农业科学院甘蔗研究所, 云南省甘蔗遗传改良重点实验室, 云南开远 661699)

摘要:为研究零添加膜法红糖加工过程中纳滤透过液(甘蔗植物水)的品质状况和开发利用价值, 试验以红皮果蔗和新台糖 22 (ROC22) 为原料, 在 800、50 nm 两级陶瓷膜串联清净的基础上, 采用 250 u 卷式膜进行纳滤浓缩, 对得到的甘蔗植物水的理化指标、营养指标和挥发性香气成分进行分析比较, 并采用营养质量指数(index of nutritional quality, INQ)法进行营养质量评价。结果表明, 两个不同品种的甘蔗植物水中均不含蔗糖, 均有蔗汁的特征香味, 与蔗汁共有的挥发性成分占蔗汁总挥发性成分的 50.00% 和 60.61%; 挥发性成分以醇类最多, 相对含量较高的有异辛醇、2-庚醇、1-戊烯-3-醇、正己醇、(-)-异雪松醇; 甘蔗植物水中检出 14 种以上的游离氨基酸, 其中有人体必需氨基酸 7 种, 含量占游离氨基酸总量的 66% 以上, 苏氨酸是其中的重要氨基酸, 在两种甘蔗植物水中的含量分别为 474.67 和 118.11 mg/L。甘蔗植物水中含有钾、钠、钙等 7 种矿物元素, 其中钾的含量最高, 分别达到 907 和 525 mg/L, 钾、铜元素的 INQ 分别达到 40 和 14 以上, 是人体钾、铜元素补充的优质来源。总体来看, 基于零添加膜法红糖工艺的纳滤甘蔗植物水是一种富含营养成分的纯天然植物风味饮用水, 具有较好的开发利用价值。

关键词:甘蔗, 纳滤, 甘蔗植物水, 品质评价

中图分类号: TS249.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)04-0041-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022040139



本文网刊:

Quality Analysis of Sugarcane Plant Water by Nanofiltration During the Processing of Membrane-Process Brown Sugar

SHEN Shiyan, WANG Zhineng, YANG Liu, YANG Ting, SHANG Shixiong, CUI Jie, YING Xiongmei*

(Sugarcane Research Institute of Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory on Genetic Improvement of Sugarcane in Yunnan Province, Kaiyuan 661699, China)

Abstract: In order to study the quality and development value of nanofiltration liquid (sugarcane plant water, SPW) by the No-added brown sugar from membrane processing, red peel fruit sugarcane and ROC 22 were used as materials to evaluate the nutritional quality with the method of index of nutritional quality (INQ), which could be obtained by comparing and calculating the physical indexes, chemical indexes, nutritional indexes and volatile aroma components of SPW with 250 u roll membrane nanofiltration concentration on the basis of two-stage ceramic membranes (800 nm and 50 nm). Results showed that SPW of two different varieties contained no sucrose and both had the characteristic fragrance of sugarcane juice. The volatile components shared with sugarcane juice accounted for 50.00% and 60.61% of the total volatile components in sugarcane juice. Alcohols were the most abundant, and the relative high contents of 2-ethylhexanol, 2-heptanol, 1-penten-3-ol, hexanol and (-)-isocedarol were higher. More than 14 kinds of free amino acids were detected in SPW, among which 7 kinds were essential amino acids for human body, accounting for more than 66% of the total free amino acids, threonine was the most important amino acid with the content in two SPW was 474.67 and 118.11 mg/L, respectively. The SPW contained 7 mineral elements such as potassium, sodium and calcium, among which the content of potassium was the highest, reaching 907 and 525 mg/L, respectively. The INQ of potassium and copper was above 40 and

收稿日期: 2022-04-14

基金项目: 云南省重大科技专项计划(202102AE090028); 云南省绿色食品品牌打造科技支撑(蔗糖产业)专项经费。

作者简介: 沈石妍(1968-), 女, 本科, 正高级工程师, 研究方向: 蔗糖深加工与副产物综合利用, E-mail: okmlshshy@sina.com。

* 通信作者: 应雄美(1982-), 男, 硕士, 副研究员, 研究方向: 蔗糖深加工与副产物综合利用, E-mail: yxu_1982@163.com。

14, respectively, which was a high-quality source of potassium and copper supplement for human body. In general, nanofiltration SPW based on No-added membrane brown sugar process was a kind of pure natural plant-flavor drinking water rich in nutrients, which had a good value of development and utilization.

Key words: sugarcane; nanofiltration; sugarcane plant water; quality evaluation

甘蔗(*Saccharum officinarum* L., ITIS, 2018)是禾本科甘蔗属多年生草本植物,是制糖的重要原料^[1]。甘蔗中除蔗糖外还含有蛋白质、氨基酸、多酚以及钾、钙、镁、锌等矿物元素^[2],储存于甘蔗中的细胞液占总质量的近 70%^[3],经压榨后与糖分、非糖分一起成为蔗汁的重要组成部分。传统制糖工艺中蔗汁蒸发后的冷凝水通常用于补充锅炉软水或作为生产用水^[4],红糖加工常压浓缩产生的蒸汽则不经冷凝直接排放,造成了资源的浪费。

膜分离技术是一种物理分离技术,具有高效、节能、环保的特点^[5],被广泛运用到众多领域^[6-7],国内外学者围绕膜分离技术在制糖上的运用开展了大量的研究工作,在适宜的膜材料的筛选、膜性能提升以及膜通量恢复等方面取得了较大的研究进展^[8-11],使成分复杂的蔗汁通过全物理膜清净技术得以实现化学澄清剂的零添加,经超滤处理的蔗汁清净效果较传统工艺有了很好的改善^[12],清汁从 15°Bx 浓缩到 20°Bx 可节约 33% 的能耗^[13],显著的节能效果使得膜浓缩成为膜法制糖的一个重要环节,也为蔗汁中甘蔗植物水的开发利用提供了条件。传统制糖工艺蔗汁蒸发浓缩产生的气凝水属于软水,基本不含营养物质,而膜浓缩则会有较多的小分子营养物质和风味成分透过卷膜进入透过液中,营养价值更高。一直以来膜浓缩透过液主要用作清洗水^[14],或作为超滤工序的稀释水^[15],多为低效利用,近年来膜浓缩透过液的开发利用逐渐受到重视,叶丽娜等采用陶瓷微滤膜结合反渗透膜系统制取甘蔗浓缩汁并分离甘蔗活性饮用水^[16],研究发现甘蔗活性饮用水中含有氨基酸、二十八烷醇、多酚、有机酸、铁、钙、硒等营养成分^[17],各项指标符合国家瓶装饮用水标准,迈出了甘蔗植物水高值化利用的第一步,但目前尚无针对不同品种甘蔗膜浓缩透过液理化指标、营养成分及挥发性香气成分差异的系统研究报道。

红糖生产过程大多不添加渗透水,蔗汁中的水均来自甘蔗的植物细胞液,零添加膜法红糖清净工艺提升了红糖产品的质量品质和安全性,也为纯天然甘蔗植物水的开发利用提供了条件。利用纳滤膜代替反渗透膜对清汁进行预浓缩,不仅可获得更好的过滤通量,而且透过液会比反渗透膜具有更多风味营养成分。本试验拟在前期优化形成的 800 nm、50 nm 两级陶瓷膜串联清净工艺的基础上^[18],通过对截留分子量为 500、250、150 u 的卷式膜过滤通量及透过液指标的综合评价,筛选适宜的纳滤膜进行清汁的预浓缩,并对不同品种甘蔗制成的甘蔗植物水的理化指标、营养指标、挥发性香气成分进行比较研究,为甘

蔗植物水高值化开发利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

红皮果蔗 开远市西城农贸市场采购得到;新台糖 22 号(ROC22) 云南省农业科学院甘蔗研究所第一科研基地提供;没食子酸标准品 纯度 $\geq 99.9\%$,中国食品药品检定研究所;亮氨酸标准品 纯度 $\geq 98\%$,北京普天同创生物科技有限公司;福林-酚试剂 绿源生物科技有限公司;无水 Na_2CO_3 、碱式醋酸铅、中性醋酸铅、盐酸、氯化钠、水合茛三铜、氯化亚锡、磷酸氢二钠、磷酸二氢钾、正丙醇、正丁醇、乙二醇、乙酸、乙酸钠、抗坏血酸、乙醇 均为国产分析纯。

CeraMem-0100 陶瓷膜/管式膜小试设备、RNF-0460 多功能卷式膜小试设备 厦门福美科技有限公司;kJeltec TM8400 全自动凯氏定氮仪 美国 Foss 公司;L-8900 全自动氨基酸分析仪 日本日立高新技术公司;Prodigy 电感耦合等离子体发射光谱仪 美国 Teledyne Leeman Labs公司;ED 40G 电热消解仪 奥普勒仪器有限责任公司;UV-5800 PC 紫外分光光度计 上海元析仪器有限公司;DDSJ-308A 电导仪 上海仪电科学仪器股份有限公司;TRACE1310/ISQ7000 气相色谱-质谱联用仪器(GC-MS) 美国 Thermo Fisher 公司;75 μm 碳分子筛/聚二甲基硅氧烷萃取头(CAR/PDMS) 美国 Supelco公司;陶瓷膜 上海科琅膜技术有限公司;卷式膜 美国 GE 水处理及工艺过程处理公司;膜元件性能参数见表 1。

表 1 膜元件性能参数

Table 1 Performance parameters of membrane components

名称	型号	孔径或截留分子量	有效膜面积(m^2)	水通量($\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$)	操作压力(Mpa)	操作温度($^{\circ}\text{C}$)
陶瓷膜	SMC-250	800 nm	0.12	950	≤ 0.6	5~85
陶瓷膜	SMC-210	50 nm	0.12	400	≤ 0.6	5~85
卷式膜	GE1812	500 u	0.37	65	≤ 4.0	5~50
卷式膜	DL1812	250 u	0.37	50	≤ 4.0	5~50
卷式膜	DK1812	150 u	0.37	38	≤ 4.0	5~50

1.2 实验方法

1.2.1 甘蔗预处理方法 甘蔗经实验室小型压榨机榨汁后,用 200 目滤网过滤蔗汁,除去其中的悬浮杂质,所得粗滤汁加热煮沸,撇净不断上浮的黑色浮沫,然后经 200 目滤网过滤得到初步清汁。

1.2.2 膜过滤工艺方案 采用孔径为 800 nm、50 nm 的两组陶瓷膜串联完成蔗汁的清净得到清汁,进膜压力 0.25 Mpa,跨膜压差 0.13 MPa,平均温度 50 $^{\circ}\text{C}$ 。

清汁采用卷膜预浓缩,进、出口压力均为 3.0 MPa,平均温度 40 ℃。整个工艺过程不添加工艺水及包括石灰乳在内的加工助剂,纳滤透过液完全来自甘蔗中的植物水,工艺流程见图 1 所示。

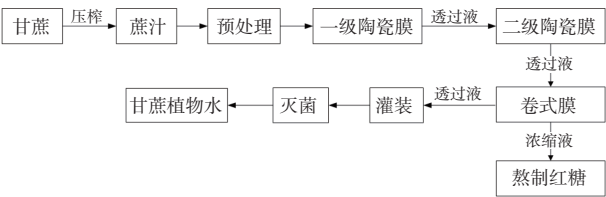


图 1 甘蔗植物水分离工艺流程图

Fig.1 Process flowchart of water separated from sugarcane

1.2.3 常规理化指标的测定 锤度、蔗糖分、还原糖分、电导灰分、色值、混浊度按照《甘蔗制糖化学管理分析方法》(1995 版)进行测定^[19]。

1.2.4 总多酚含量的测定 采用 Folin-Ciocalteu 法参照文献 [20–21] 的方法测定。

1.2.4.1 标准曲线制作 准确吸取 0.1 mg/mL 没食子酸标准溶液 0、0.10、0.20、0.30、0.40、0.50、0.60、0.70 mL 于 10 mL 比色管中,依次加入 0.2 mol/L 的福林酚试剂 1.0 mL 和 15% Na₂CO₃ 溶液 2 mL,用超纯水定容至 10 mL,充分混合后,室温静置 1 h,于 765 nm 波长下测定吸光度值,试剂空白调零,以没食子酸浓度 C(μg/mL)为横坐标,吸光值 A 为纵坐标,绘制得到标准曲线为 y=0.0952x+0.0023,决定系数 R²=0.9979。

1.2.4.2 样品测定 吸取 1 mL 样液于 10 mL 比色管中按照标准曲线方法进行测定。

1.2.5 游离氨基酸总量的测定 参照 GB/T 8314-2013《茶 游离氨基酸总量的测定》测定。

1.2.6 矿物元素含量的测定 委托云南省分析测试中心按照 GB 5009.268-2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》第一法电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定。

1.2.7 氨基酸组成的测定 委托云南省分析测试中心按照 GB 5009.124-2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定》测定。

1.2.8 香气成分的测定 委托云南省分析测试中心采用微固相萃取顶空进样气相色谱-质谱法(GC-MS)测定,色谱条件参照杨婷等^[22]的方法。

1.2.8.1 GC 条件 色谱柱:安捷伦 HP-INNOWAX 毛细柱(60 m×0.25 mm, 0.25 μm);进样口 250 ℃解

吸 5 min,不分流进样,载气 He,流量 1 mL/min;升温程序:50 ℃保持 1 min,以 4 ℃/min 升至 120 ℃,保持 2 min,以 4 ℃/min 升至 200 ℃,保持 2 min,以 15 ℃/min 升至 250 ℃,保持 5 min。

1.2.8.2 MS 条件 质谱条件:传输线 260 ℃,离子源 250 ℃,EI 源,电离电压 70 eV,扫描范围 30~450 amu。

1.2.8.3 样品预处理方法 吸取 5 mL 样品放入 20 mL 顶空瓶中,加入 0.6 g NaCl,60 ℃ 水浴萃取 50 min 后进行 GC-MS 检测。

1.2.9 营养质量评价 采用 INQ 法,根据《中国居民膳食营养素参考摄入量》^[23] 推荐值(见表 2)按下式计算。当 INQ<1 时,表明该类营养素含量低于推荐供给量,长期食用会导致该类营养物质缺乏;当 INQ≥1 时,表明该类营养素含量达到或高于推荐供给量,说明营养质量好;当 INQ>2 时,表明该食物可作为该类营养素的良好来源^[24–25]。

$$INQ = \frac{\text{一定量食物中某营养素含量} / \text{该营养素的推荐摄入量}}{\text{一定量食物提供的能量} / \text{能量需要标准}}$$

1.3 数据处理

所有实验进行 3 次重复测定,利用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据处理,采用 SPSS 22.0 进行配对样本 t 检验,以 P<0.05 为差异显著性标准,结果用平均值±标准偏差表示。

2 结果与分析

2.1 纳滤膜的选择

不同过滤孔径的纳滤膜具有不同的过滤效果。从表 3 可以看出,3 组卷膜的平均通量随截留分子量的减小依次降低,250、150 u 卷膜的平均通量分别为 500 u 的 54.89% 和 31.95%,采用较大的膜通量可以获得更高的工艺效率。500 和 250 u 卷膜透过液具有明显的蔗汁特征香味,150 u 卷膜透过液则香味较淡,其色值依次为 1918、308、8 IU,与图 2 外观颜色情况一致,说明 150 u 卷膜有效隔离了蔗汁中的色素物质,而 250 u 卷膜仍可透过少量色素物质。500 u 卷膜透过液的蔗糖分为 2.88%,其余两个样品分别为 0.05% 和 0%,说明 250 u 的卷式膜已能实现对蔗糖的分离,但分子量较小的还原糖仍可通过(含量为 0.33%),150 u 卷膜则对还原糖也有较好的隔离效果(含量仅为 0.02%)。

氨基酸、蛋白质、酚类物质是蔗汁中重要的营养物质,从表 3 可以看出不同截留分子量卷膜透过液中蛋白质、游离氨基酸的质量分数随卷膜截留分子

表 2 营养素参考摄入量及能量需要量

Table 2 Nutrient reference intakes and energy requirements

营养素	蛋白质(g/d)	碳水化合物(g/d)	钾(mg/d)	钠(mg/d)	钙(mg/d)	镁(mg/d)	铁(mg/d)	锌(mg/d)	铜(mg/d)	能量(kJ/d)
参考摄入量	60	120	2000	1450	900	330	14	10	0.8	9625

注:能量以18~50岁男、女活动水平(中度)平均值计算;蛋白质按18岁以上男性、女性推荐摄入量平均值计算;碳水化合物按18~65岁平均需要量计算;钾、钠按18~50岁适宜摄入量平均值计算;钙、镁按18~50岁参考摄入量平均值计算;铁、锌、铜按18~50岁男、女参考摄入量平均值计算。

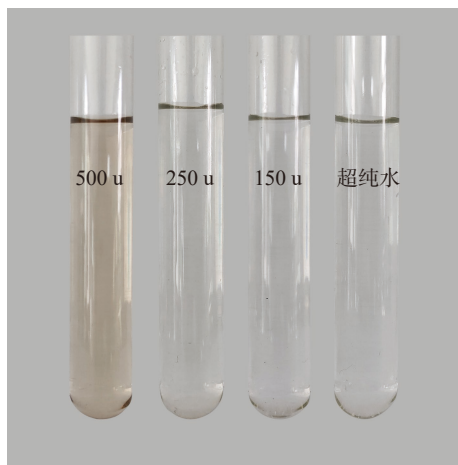


图 2 不同截留分子量卷膜透过液

Fig.2 Membrane permeation fluid with different molar weight cut-off

表 3 不同截留分子量卷膜透过液(甘蔗植物水)指标情况

Table 3 Indexes of membrane permeation fluid (SPW) with different molar weight cut-off

指标类别	截留分子量(u)	500	250	150
工艺指标	平均通量L/(m ² ·h)	26.6	14.6	8.5
感官指标	颜色	黄褐色	微黄	无色
	气味	蔗汁香气较浓	蔗汁香气较浓	香味较淡
理化指标	色值(IU)	1918	308	8
	蔗糖分(%)	2.89	0.05	0.00
	还原糖分(%)	0.33	0.33	0.02
	多酚(mg/100 g)	9.5	10.8	1.9
营养指标	蛋白质(mg/100 g)	170.1	118.6	4.0
	游离氨基酸(mg/100 g)	175.7	122.3	17.1

量减小依次降低,且游离氨基酸和蛋白质的含量较为接近,说明大分子的蛋白质无法进入透过液中,仅游离氨基酸可以透过卷膜。500 和 250 u 卷膜透过液中多酚的质量分数分别为 9.5 和 10.8 mg/100 g, 150 u 的则较二者明显降低,仅为 1.9 mg/100 g,应与蔗汁中含有较多的奎尼酸、莽草酸、咖啡酸、香豆酸、阿魏酸等酚酸类物质有关^[26],其分子量大多在 150~200 间,可透过 500 和 250 u 卷膜而被 150 u 卷膜截留。本研究的目的在于考察将膜法红糖工艺中纳滤透过液开发为天然甘蔗植物风味饮用水的价值,故需要尽可能多地保留蔗汁的风味成分和营养成分,减少蔗糖含量,同时兼顾外观颜色和膜通量的工艺可行性,综合以上,采用截留分子量为 250 u 的卷膜效果最佳,后续过程均选择 250 u 卷膜进行试验。

2.2 不同品种甘蔗植物水理化指标

为研究不同品种甘蔗植物水的品质特征,本研究选择红皮果蔗和 ROC22 两个特性差异较大的甘蔗品种作为实验对象,按照前述工艺分别制取甘蔗植物水。从表 4 可看出,两个甘蔗植物水中均未检出蔗糖,与叶丽娜^[17]分离得到的甘蔗植物水一致。红皮果蔗植物水中还原糖分 0.40 g/100 g, ROC 22 中未检出还原糖,这应与 ROC 22 是从甘蔗基地

新鲜取样,蔗汁还原糖含量较低(0.23 g/100 g)有关,而从市场采购的红皮果蔗本身还原糖含量较高(1.68 g/100 g),有较多还原糖透过卷膜所致,从两个样品的锤度分别为 0.5°Bx、0.1°Bx 也印证了红皮果蔗植物水中可溶性固形物含量更高。

表 4 不同甘蔗品种蔗汁与甘蔗植物水理化指标

Table 4 Physicochemical indexes of sugarcane juice and sugarcane plant water from different varieties

项目	蔗汁		甘蔗植物水	
	红皮果蔗	ROC 22	红皮果蔗	ROC 22
外观	黄绿色混浊液体	黄绿色混浊液体	微黄透明液体	微黄透明液体
锤度(°Bx)	18.3±0.03*	20.8±0.05*	0.5±0.00*	0.1±0.00*
蔗糖分(g/100 g)	15.67±0.07*	18.71±0.04*	0.00±0.00	0.00±0.00
还原糖分(g/100 g)	1.69±0.03*	0.19±0.01*	0.40±0.04*	0.00±0.00*
电导灰分(g/100 g)	2.12±0.00*	1.08±0.01*	2.21±0.01*	1.49±0.01*
色值(IU)	2936±7.51*	2289±12.90*	371±7.21*	357±5.77*
混浊度(MAU)	16724±48.60*	17549±50.33*	29±3.79	22±3.22

注: *表示不同样品同一指标在0.05水平上差异显著;表5~表6同。

两个品种甘蔗植物水的电导灰分分别为 2.21 和 1.49 g/100 g,均高于相应蔗汁的电导灰分 2.12 和 1.08 g/100 g,说明蔗汁中的矿物元素能透过卷膜富集到透过液中,提高了甘蔗植物水的营养价值,同时浓缩汁灰分降低也可减轻后续熬煮过程设备的结垢。红皮果蔗植物水的色值和混浊度分别为 371 IU 和 29 MAU,略高于 ROC 22 的 357 IU 和 22 MAU,色值间存在显著差异($P<0.05$),应与不同甘蔗品种中小分子色素物质种类及含量差异有关。相较于蔗汁,纳滤透过液的混浊度去除率分别达到 99.8% 和 99.9%,二者混浊度无显著差异($P>0.05$),说明 250 u 卷膜较好地阻隔了蔗汁中的悬浮杂质和大分子不溶性有机物,甘蔗植物水透性较好。

2.3 不同品种甘蔗植物水营养成分及营养质量评价

甘蔗中的多酚具有较好的抗氧化活性^[27-28],有研究表明多酚含量与抗氧化活性间存在极强的正相关性^[29-30],从表 5 可以看出,红皮果蔗植物水中总多酚和蛋白质含量均显著高于 ROC 22($P<0.05$),说明果蔗中含有更多小分子的酚类物质和游离氨基酸,红皮果蔗制成的甘蔗植物水应具有更高的营养价值和抗氧化活性。矿物质是人体必需的重要营养元素,两个样品中均检出 7 种矿物元素,红皮果蔗植物水各矿物元素的含量均高于 ROC 22,钾、钠、钙、镁含量存在显著差异($P<0.05$)。两个样品中钾含量均最高,分别达到 90.7 和 52.5 mg/100 g,应与甘蔗中钾含量普遍较高有关^[31],钠、钙、镁 3 种元素其次,质量分数在 0.27~2.39 mg/100 g 间,微量元素中铁、锌、铜的质量分数均大于 0.010 mg/100 g,均未检出硒和钴(低于检出限 0.005 mg/100 g),与叶丽娜等人的检测结果钙含量为 3.5 mg/100 g、铁含量 0.61 mg/100 g、

硒含量 0.003 mg/100 g 相比略偏低^[17], 应与二者所用甘蔗原料不同、种植地土壤矿物元素组成含量不同, 甘蔗本身矿物元素含量也有差异有关。

表 5 不同品种甘蔗植物水营养成分及营养质量评价
Table 5 Evaluation of nutrient composition and nutritional quality of sugarcane plant water from different varieties

项目	含量(mg/100 g)		营养质量指数(INQ)	
	红皮果蔗	ROC 22	红皮果蔗	ROC 22
能量(kJ/100 g)	10.20±0.115*	5.54±0.037*	—	—
总多酚	1.16±0.025*	0.70±0.060*	—	—
蛋白质	87±2.516*	34±2.082*	1.37	0.98
碳水化合物	340±0.011*	140±0.006*	2.67	2.03
钾	90.7±4.04*	52.5±4.00*	42.79	45.61
钠	2.39±0.404*	2.11±0.200*	1.56	2.53
钙	1.85±0.361*	1.67±0.208*	1.94	3.22
镁	0.63±0.153*	0.27±0.015*	1.8	1.4
铁	0.011±0.005	0.010±0.015	0.74	1.24
锌	0.017±0.040	0.015±0.025	1.60	2.61
铜	0.012±0.025	0.010±0.025	14.15	21.72
硒	<0.005	<0.005	—	—
钴	<0.005	<0.005	—	—

注: 表中“—”表示未检出或无法计算; 表6~表7同。

INQ 法是食物营养质量评价的常用方法, 表 5 两个甘蔗植物水样品中钾的 INQ 分别为 42.79、45.61, 铜的 INQ 分别为 14.15、21.72, 均远大于 2, 说明甘蔗植物水可作为钾、铜元素补充的良好来源。香蕉中富含钾元素, 是缺钾人群补钾的较佳食用选择^[32], 梁水连等^[24]研究结果显示 5 个不同品种香蕉中钾的 INQ 均值为 4.40, 本试验两个甘蔗植物水样品中钾的 INQ 分别为 42.79、45.61, 约为香蕉均值的 10 倍, 会较香蕉具有更加突出的补钾效果。除红皮果蔗植物水中铁元素和 ROC22 植物水中蛋白质的 INQ<1 以外, 其余营养素的 INQ 均介于 1.37~3.22 之间, 高于推荐供给量, 可满足人体的需求。本试验所用 250 u 卷式膜较好地隔离了蔗汁中的蔗糖, 不含蔗糖的甘蔗植物水的能量保持在一个较低的水平, 分别为 10.20 和 5.54 kJ/100 g, 作为一种日常风味饮用

水可适用于不同的消费人群。

2.4 不同品种甘蔗植物水中游离氨基酸种类及含量

氨基酸种类、含量及组成是评价蛋白质营养价值的重要指标, 本试验从红皮果蔗和 ROC 22 制成的甘蔗植物水中分别检出 15 和 14 种游离氨基酸(见表 6), 均含有苏氨酸、缬氨酸、赖氨酸等 7 种人体必需氨基酸(EAA), 游离氨基酸总量(TFAA)分别为 705.13 和 184.03 mg/L, 与叶丽娜^[17]检出的甘蔗植物水中 TFAA 为 500 mg/L 的结果在数量级上一致, 数值上的差异应与不同品种甘蔗本身氨基酸含量差异有关。本试验中 EAA 与 TFAA 的比值(EAA/TFAA)分别达到 69.92% 和 65.96%, 苏氨酸是其中的重要氨基酸, 含量达到 474.67 和 118.11 mg/L, 分别占 EAA 总量的 96.28% 和 95.32%。苏氨酸是一种重要的营养强化剂, 有恢复人体疲劳、促进生长发育的效果^[33], 对人体皮肤具有保湿作用, 在体内还能促进磷脂合成和脂肪酸氧化^[34]。我国居民多以谷类粮食为主食, 精米、细面及其他谷类食物中大多缺乏赖氨酸、苏氨酸等必需氨基酸^[35], 降低了人体对蛋白质的利用率, 甘蔗植物水具有较高的苏氨酸比例, 可作为谷类粮食苏氨酸缺乏的一个补充来源。

2.5 不同品种甘蔗植物水挥发性香气成分

本试验从两个不同品种甘蔗的蔗汁及甘蔗植物水中共检测出 62 种挥发性成分(见表 7), 在红皮果蔗、ROC22 的蔗汁中分别检测出 36 和 33 种挥发性成分, 二者共有的组分为 29 种, 包括醇类 10 种、醛类 12 种、酸类 1 种、酯类 1 种、其它 5 种。在红皮果蔗制成的甘蔗植物水中检出 34 种挥发性成分, 与蔗汁共有组分 18 种, 其中包括醇类 7 种、醛类 7 种、酸类 1 种、酯类 1 种、其它 2 种; 在 ROC22 的甘蔗植物细胞水中共检出 41 种挥发性成分, 其中与蔗汁共有组分 20 种, 包括醇类 9 种、醛类 5 种、酸类 1 种、酯类 1 种、其它 4 种。两种甘蔗植物水中共有的组分为 26 种, 其中醇类 12 中、醛类 6 种、酸类 3 中、酯类 3 种、其它 2 种。

从上述结果可以看出, 蔗汁中挥发性成分以醛类最多、醇类其次, 二者相对含量总和分别占挥发性

表 6 不同品种甘蔗植物水氨基酸组成情况(mg/L)

Table 6 Amino acid composition and concentration of cells water from different sugarcane varieties (mg/L)

项目	红皮果蔗	ROC 22	项目	红皮果蔗	ROC 22
赖氨酸 [#]	2.55±0.053*	0.18±0.035*	甘氨酸	5.74±0.057*	2.57±0.071*
苏氨酸 [#]	474.67±0.853*	118.13±1.206*	丝氨酸	100.64±0.315*	23.53±0.304*
缬氨酸 [#]	11.62±0.351*	3.50±0.045*	组氨酸	0.89±0.047*	1.85±0.040*
异亮氨酸 [#]	0.96±0.045*	0.47±0.049*	天冬氨酸	5.24±0.050	—
亮氨酸 [#]	0.61±0.050*	0.14±0.015*	半胱氨酸	21.96±0.121*	5.94±0.206*
蛋氨酸 [#]	1.23±0.040*	0.66±0.049*	酪氨酸	2.27±0.053*	0.39±0.056*
苯基丙氨酸 [#]	1.34±0.046*	0.85±0.056*	TFAA	705.13±2.432	184.03±1.090*
精氨酸	29.57±0.903*	22.36±0.609*	EAA	493.00±1.237*	121.38±1.075*
丙氨酸	45.82±0.268*	6.01±0.174*	EAA/TFAA	69.92±0.083*	65.96±0.251*

注: 名称后标注#表示人体必需氨基酸。

表 7 不同品种蔗汁与甘蔗植物水挥发性成分及相对含量

Table 7 Volatile composition and relative concentration of sugarcane juice and sugarcane plant water

保留时间(min)	挥发性物质名称	相对含量(%)			
		蔗汁		甘蔗植物水	
		红皮果蔗	ROC 22	红皮果蔗	ROC 22
醇类(20种)					
7.102	1-戊烯-3-醇	—	—	4.22	2.20
8.136	异戊醇	0.95	—	1.86	0.72
9.252	正戊醇	4.76	2.30	5.44	2.62
11.194	2-庚醇	9.73	21.31	5.11	3.02
11.333	顺-2-戊烯醇	—	—	3.35	2.95
11.922	4-甲基-5-己烯-2-醇	—	0.43	4.81	0.41
12.204	正己醇	2.50	1.38	6.31	2.01
13.146	叶醇	0.75	0.57	0.55	0.35
14.088	2-辛醇	1.13	1.40	—	—
15.034	1-辛烯-3-醇	3.02	3.59	0.77	0.57
16.217	异辛醇	—	—	12.6	8.77
18.217	正辛醇	1.09	1.03	—	0.68
20.071	2-辛烯-1-醇	0.95	0.9	—	0.49
21.588	十一醇	0.59	0.53	—	—
21.944	3-呋喃甲醇	—	—	—	0.28
22.945	2-茨醇	—	—	0.41	—
28.468	叔十六硫醇	0.36	—	—	0.43
28.577	苯甲醇	—	—	—	0.73
29.485	苯乙醇	—	—	0.53	0.33
34.410	(-)-异雪松醇	2.86	1.47	3.84	9.00
醛类(18种)					
3.113	异戊醛	7.00	6.17	—	—
3.599	2-甲基丁醛	—	—	—	1.68
5.160	正己醛	9.69	16.85	0.92	—
8.320	5-十八烯醛	0.69	0.54	0.32	0.43
11.432	2-庚醛	7.08	0.73	—	—
12.653	5-乙基环戊烯-1-甲醛	—	—	1.45	—
13.037	14-八角烯醛	—	—	0.49	—
13.326	壬醛	0.81	—	—	—
13.857	5-乙基环戊烯-1-甲醛	3.80	2.30	0.68	1.60
14.248	反-2-辛烯醛	3.20	3.08	0.05	—
15.306	3-甲硫基丙醛	2.58	0.95	—	—
15.598	(E,E)-2,4-庚二烯醛	0.83	1.31	—	—
15.639	3-糠醛	—	—	8.19	8.41
16.935	3-羟基-4-甲氧基苯甲醛	0.52	0.48	0.69	0.42
17.200	苯甲醛	1.81	0.82	5.08	5.67
17.482	2, 5-二羟基苯甲醛	—	3.83	—	—
21.030	苯乙醛	8.92	3.35	3.45	1.15
22.890	2,4-壬二烯醛	0.26	0.44	—	—
酸类(5种)					
15.690	乙酸	—	—	1.4	0.67
17.455	3-羟基苯甲酸	3.62	1.56	2.79	2.78
30.781	异辛酸	—	—	0.99	0.61
36.134	壬酸	0.48	—	—	0.44
42.511	苯甲酸	—	—	—	2.82
酯类(8种)					
10.442	乙酸乙酯	—	—	—	3.02
15.204	甲酸庚酯	0.21	—	—	—
17.645	香草酸乙酯	—	—	0.51	—
25.499	4-乙基苯甲酸2-丁酯	0.44	—	5.30	1.11

续表 7

保留时间(min)	挥发性物质名称	相对含量(%)			
		蔗汁		甘蔗植物水	
		红皮果蔗	ROC 22	红皮果蔗	ROC 22
28.124	2,2,4-三甲基戊二醇异丁酯	—	—	0.86	1.37
33.124	壬酸甲酯	—	—	—	0.38
44.089	邻苯二甲酸异丁酯	2.61	4.15	1.50	3.19
44.732	乙二醇月桂酸酯	—	—	0.98	—
其它(11种)					
2.178	二甲硫醚	9.09	10.29	—	—
5.133	二甲基二硫醚	—	—	—	16.84
5.616	2-十四烷基泛酰巯基乙胺	0.99	4.58	—	—
8.490	4-(叔丁基)-1-环己烯	1.00	—	—	—
9.415	5-(丙基-2-烯酰氧基)十五烷	—	0.51	—	—
12.823	二甲基三硫醚	—	—	—	0.63
17.955	(+)-1,7-二表- α -雪松烯	—	—	0.42	0.72
18.741	二甲基亚砷	0.64	0.77	—	2.19
19.037	雪松烯	—	0.04	—	0.20
19.115	异佛尔酮	0.44	0.68	2.70	0.50
39.396	2,4-二叔丁基苯酚	0.36	0.55	10.60	5.04

物质总量的 75.88% 和 75.76%, 其中相对含量较高的是正己醛、苯乙醛、2-庚醇、1-辛烯-3-醇。经超滤和纳滤后, 甘蔗植物水中的挥发性成分发生了较大的变化, 与蔗汁共有的挥发性成分占蔗汁挥发性成分总量的 50.00% 和 60.61%。甘蔗植物水中的挥发性成分以醇类物质最多, 占到总量的 49.80% 和 35.56%, 其中异辛醇、2-庚醇、1-戊烯-3-醇、正己醇、(-)-异雪松醇的相对含量较高。两个甘蔗植物水中醛类物质的相对含量均较蔗汁有明显下降, 从 47.19%、40.85% 下降到 10.32%、19.36%, 这应与醛类物质的化学性质较为活泼, 易发生氧化还原反应生成醇和酸有关^[36]。两个品种的甘蔗植物水均具有蔗汁的特征香味, 4 个样品中共有的组分为 2-庚醇、正己醇、叶醇、1-辛烯-3-醇、(-)-异雪松醇、5-十八烯醛、5-乙基环戊烯-1-甲醛、3-羟基-4-甲氧基苯甲醛、苯乙醛、邻苯二甲酸异丁酯、异佛尔酮、2,4-二叔丁基苯酚, 初步判定应是蔗汁的重要呈香物质。

3 结论

本研究是基于膜法红糖工艺中, 以 800 nm、50 nm 两级陶瓷膜和 250 u 卷膜串联完成蔗汁清淨和预浓缩, 结果显示 250 u 卷膜可较好地隔离蔗汁中的蔗糖并能让小分子营养物质进入到纳滤透过液中, 2 个不同品种甘蔗制成的纳滤甘蔗植物水中均保持有蔗汁的特征香味, 均含有钾、钠、钙等多种矿物元素以及氨基酸、多酚等小分子营养物质, 作为一种纯天然植物饮用水具有较好的开发利用价值。本试验属于探索性研究, 仅选取了红皮果蔗和 ROC22 两个不同类型的甘蔗品种进行试验, 所制成的甘蔗植物水中挥发性成分和营养成分均存在不同程度的差异, 相比而言红皮果蔗制成的甘蔗植物水品质更优, 营养价值更高。在后续研究中应以甘蔗植物水感官风味和营养

品质的提升为目标, 在更大范围内筛选适宜的甘蔗品种, 为甘蔗植物水的高值化开发利用提供理论支撑。

参考文献

[1] 杜习纳. 陶瓷膜过滤甘蔗汁超高压杀菌工艺及其品质的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2020. [DU X S. Study on optimised high pressure processing sterilization and its quality of sugarcane juice derived from ceramic membrane filtration[D]. Nanning: Guangxi University, 2020.]

[2] 杨柳, 王智能, 沈石妍, 等. 红糖加工型甘蔗种质资源评价与筛选方法的建立[J]. 植物遗传资源学报, 2021, 22(2): 532–539. [YANG L, WANG Z N, SHEN S Y, et al. Evaluation and screening method of sugarcane germplasm resources for brown sugar production[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2021, 22(2): 532–539.]

[3] 李杨瑞. 现代甘蔗学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010: 61. [LI Y R. Modern sugarcane science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010: 61.]

[4] 广州轻工业学校, 四川轻工业学校. 甘蔗制糖工艺学[M]. 北京: 轻工业出版社, 1985: 233. [Guangzhou Light Industry School, Sichuan Light Industry School. Sugar technology of sugarcane[M]. Beijing: Light Industry Press, 1985: 233.]

[5] ROBERTO C M, CARMELA C, ALFREDO C. Membrane-based technologies for meeting the recovery of biologically active compounds from foods and their by-products[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(18): 2927–2948.

[6] CZUBA K, BASTRZYK A, ROGOWSKA A, et al. Towards the circular economy-A pilot-scale membrane technology for the recovery of water and nutrients from secondary effluent[J]. Science of the Total Environment, 2021, 791(15): 1–11.

[7] KUMAKIRI I, YOKOTA M, TANAKA R, et al. Process intensification in bio-ethanol production-recent developments in membrane separation[J]. Processes, 2021, 9(6): 1028.

- [8] MADSEN R F. Application of ultrafiltration and reverse osmosis to cane juice[J]. *International Sugar Journal*, 1973, 75(894): 163–167.
- [9] WITTEW S. Applications for stainless steel crossflow membranes in sugar processing[C]//Symposium on Advanced Technology for Raw Sugar and Cane and Beet Refined Sugar Production, New Orleans, LA, 28th Annual Joint Meeting of ASSCT, 1999: 9–10.
- [10] LUO J Q, HANG X F, ZHAI W, et al. Refining sugarcane juice by an integrated membrane process: Filtration behavior of polymeric membrane at high temperature[J]. *Journal of Membrane Science*, 2016, 509: 105–115.
- [11] VU T, LEBLANC J, CHOU C C. Clarification of sugarcane juice by ultrafiltration membrane: Toward the direct production of refined cane sugar[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 264(1): 1–5.
- [12] STEINDL R J. Membrane filtration technology in the cane sugar industry[J]. *Proceedings of the Royal Society of London A. Sugar Cane Technol*, 2001, 24: 3–14.
- [13] MADAENI S S, ZERESHKI S. Reverse osmosis alternative: Energy implication for sugar industry[J]. *Chemical Engineering & Processing Process Intensification*, 2008, 47(7): 1075–1080.
- [14] 罗建泉, 万印华, 杭晓风. 一种面向机械化收割的甘蔗混合汁膜法清静预处理方法: 中国, 201710117704.0[P]. 2018-04-20. [LUO J Q, WAN Y H, HANG X F. A cleaning pretreatment method of sugarcane mixed juice membrane for mechanized harvesting: China, 201710117704.0 [P]. 2018-04-20.]
- [15] JEGATHEESAN V, SHU L, PHONG D D, et al. Clarification and concentration of sugar cane juice through ultra, nano and reverse osmosis membranes[J]. *Membrane Water Treatment*, 2012, 3(2): 99–111.
- [16] 叶丽娜, 凌国庆, 彭文博, 等. 一种甘蔗饮用水及复配甘蔗汁饮料的生产工艺: 中国, 201510105754.8[P]. 2015-03-11. [YE L N, LING G Q, PENG W B, et al. A production process of sugarcane drinking water and mixed sugarcane juice beverage: China, 201510105754.8 [P]. 2015-03-11.]
- [17] 叶丽娜. 纯天然甘蔗植物水及生产工艺技术[R]. 广西壮族自治区, 广西叶茂食品有限责任公司, 2015. [YE L N. Pure natural sugarcane plant water and production technology[R]. Guangxi Zhuang Autonomous Region, Guangxi Yemao Food Co., Ltd., 2015.]
- [18] 沈石妍, 胡瑞云, 李艳芳, 等. 膜过滤在蔗汁清静中的运用研究[J]. *中国糖料*, 2017, 39(1): 20–22. [SHEN S Y, HU R Y, LI Y F, et al. Effect of different pesticides on sugarcane pests[J]. *Sugar Crops of China*, 2017, 39(1): 20–22.]
- [19] 李塘, 郑长庚. 甘蔗制糖化学管理分析方法[M]. 广州: 中国轻工总会甘蔗糖业质量监督检测中心, 1995: 27–63. [LI Y, ZHENG C G. Chemical management analysis of sugarcane sugar production[M]. Guangzhou: Sugar Industry Quality Supervision and Testing Center of National Light Industry Association, 1995: 27–63.]
- [20] 吴振, 李红, 王勇德, 等. 不同热处理温度对蓝莓果汁在冷藏过程中多酚和黄酮含量的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(17): 209–215. [WU Z, LI H, WANG Y D, et al. Effects of different thermal-treated temperatures on polyphenols and flavonoids of blueberry juice during cold storage[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(17): 209–215.]
- [21] SINGLETON V, ROSSI J A. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents[J]. *American Journal of Enology and Viticulture*, 1965, 16(3): 144–158.
- [22] 杨婷, 沈石妍, 王智能, 等. 不同加工方式红糖营养成分与香气成分分析比较[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(19): 43–55. [YANG T, SHEN S Y, WANG Z N, et al. Analysis and comparison of nutritional components and aroma components of brown sugar with different processing methods[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(19): 43–55.]
- [23] 杨月欣. 中国食物成分表标准版 第一册(第6版)[M]. 北京: 北京大学医学出版社, 2018: 330–337. [YANG Y X. China food composition tables, Standard Edition Vol.1 (6th Ed) [M]. Beijing: Peking University Medical Press, 2018: 330–337.]
- [24] 梁水连, 吕岱竹, 周若浩, 等. 香蕉中5种矿物质元素含量测定及营养评价[J]. *食品科学*, 2019, 40(24): 241–245. [LIANG S L, LÜ D Z, ZHOU R H, et al. Quantitative determination and nutritional evaluation of five minerals in banana[J]. *Food Science*, 2019, 40(24): 241–245.]
- [25] SOREN N M, BISWAS A K. Methods for nutritional quality analysis of meat[J]. *Meat Quality Analysis*, 2020: 21–36.
- [26] BARRERA C, BETORET N, L SEGUÍ. Phenolic profile of cane sugar derivatives exhibiting antioxidant and antibacterial properties[J]. *Sugar Tech*, 2020, 22(3): 798–811.
- [27] 郑瑞. 甘蔗多酚抗氧化、降血糖、抗肿瘤细胞增殖活性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017. [ZHENG R. Research on the antioxidant, antihyperglycemic and antiproliferative activities of phenolics from sugarcane[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.]
- [28] SASKA M, CHUNG C C. Antioxidant properties of sugarcane extracts[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 37(10): 108–111.
- [29] 尚煜豪, 侯楚璇, 盖莉莉, 等. 基于陶瓷膜过滤工艺制备甘蔗红糖的多酚组成以及抗氧化研究[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(18): 89–97. [SHANG Y H, HOU C X, GAI L L, et al. Polyphenol compositions and antioxidant activity of non-centrifugal sugars prepared by ceramic membrane filtration process[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(18): 89–97.]
- [30] 师聪, 官号, 李茹, 等. 苹果不同极性萃取物总黄酮、总多酚含量与其抗氧化活性的相关性[J]. *化学试剂*, 2022, 44(1): 84–89. [SHI C, GONG H, LI R, et al. Correlation between the content total flavonoids and total polyphenols in amomum tsaoko with different polar ex-tracts and their antioxidant activities[J]. *Chemical Reagents*, 2022, 44(1): 84–89.]
- [31] 杨柳, 王智能, 杨婷, 等. 不同品种甘蔗矿物质元素差异研究[J]. *食品科技*, 2021, 46(6): 67–72. [YANG L, WANG Z N, YANG T, et al. Study on the mineral elements in different sugar-

cane varieties[J]. *Food Science and Technology*, 2021, 46(6): 67–72.]

[32] 王宝罗, 张安丽, 徐坤荣. 火焰光度法同时测定常见水果中的钾钠含量[J]. *淮阴师范学院学报(自然科学版)*, 2007(1): 61–63, 82. [WANG B L, ZHANG A L, XU R K. Study on urban land expansion and its driving forces of jingsu province[J]. *Journal of Huaiyin Teachers College (Natural Science Edition)*, 2007(1): 61–63, 82.]

[33] 王小生. 必需氨基酸对人体健康的影响[J]. *中国食物与营养*, 2005(7): 48–49. [WANG X S. Effects of essential amino acids on human health[J]. *Food and Nutrition in China*, 2005(7): 48–49.]

[34] 周泉钱, 朱长俊, 杜雨桐, 等. 营养缺陷型大肠杆菌高产 L-

苏氨酸的研究[J]. *生物化工*, 2020, 6(4): 52–55. [ZHOU Q Q, ZHU C J, DU Y T, et al. Study on high production of L-threonine by nutritional deficient *Escherichia coli*[J]. *Biological Chemical Engineering*, 2020, 6(4): 52–55.]

[35] 胡广甫. 杂粮谷物营养成分分析及杂粮复合营养面条预混合粉研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2018. [HU G P. Analysis of nutritional composition of grains and study on premixing powder of noodles with mixed grains[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2018.]

[36] 邢其毅, 裴伟伟, 徐瑞秋, 等. 基础有机化学上册(第 4 版)[M]. 北京大学出版社, 2016: 451. [XUN Q Y, PEI W W, XU R Q, et al. Basic organic chemistry Vol.1 (4th ed) [M]. Beijing: Peking University Press, 2016: 451.]